UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

THIAGO ITIRO IBUKI KAI

TRIBOLOGIA DO AÇO MANGANÊS HADFIELD E SUAS APLICAÇÕES PARA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO

Sorocaba
2026

THIAGO ITIRO IBUKI KAI

TRIBOLOGIA DO AÇO MANGANÊS HADFIELD E SUAS APLICAÇÕES PARA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto

Sorocaba

2026

K13t

Kai, Thiago Itiro Ibuki

Tribologia do aço manganês Hadfield e suas aplicações para resistência ao desgaste abrasivo / Thiago Itiro Ibuki Kai. -- Sorocaba, 2026

45 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: José Roberto Ribeiro Bortoleto

1. Tribologia. 2. Resistência de materiais. 3. Aço Austenítico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

THIAGO ITIRO IBUKI KAI

TRIBOLOGIA DO AÇO MANGANÊS HADFIELD E SUAS APLICAÇÕES PARA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Data da defesa: 06/07/2026

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto
UNESP - Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

_____

Prof. Dr. Nilson Cristino da Cruz
UNESP - Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

_____

Eng. Bruno Santos Americo
Metso - Sorocaba

RESUMO

Este trabalho desenvolve uma abordagem teórica sobre a tribologia do aço manganês Hadfield e sua aplicação em componentes submetidos ao desgaste abrasivo. Trata-se de uma liga austenítica, geralmente situada na faixa entre 1,0 a 1,4% de carbono e 10 a 14% de manganês, cuja importância industrial é dada a partir da combinação entre elevada tenacidade, ductilidade e capacidade de encruamento durante o serviço. A pesquisa foi conduzida por meio de um levantamento e análise de estudos que discutem composição química, microestrutura, tratamento térmico, mecanismos de deformação, ensaios tribológicos e aplicações em mineração, britagem, ferrovias e equipamentos sujeitos a impacto e desgaste. A literatura indica que a resistência ao desgaste não pode ser explicada apenas pela dureza inicial do material. Ela depende da estabilidade da matriz austenítica, da dissolução adequada de carbonetos, do tamanho de grão, da presença controlada de elementos de liga e, principalmente, da severidade do contato abrasivo. Quando há impacto e deformação suficientes, a superfície endurece progressivamente por maclação, multiplicação de discordâncias e interação de defeitos cristalinos, ao mesmo tempo em que o núcleo permanece tenaz. Porém, em condições leves, esse mecanismo pode não ser totalmente ativado. Portanto, o aço Hadfield continua relevante para mandíbulas de britadores, revestimentos, peças ferroviárias e componentes de mineração, desde que sua escolha considere as condições reais de fabricação, tratamento térmico, abrasividade, impacto e manutenção.

Palavras-chave: aço Hadfield; tribologia; desgaste abrasivo; encruamento; aço manganês austenítico.

ABSTRACT

This work presents a theoretical review of the tribology of Hadfield manganese steel and its use in components exposed to abrasive wear. Hadfield steel is an austenitic alloy, commonly containing approximately 1.0 to 1.4 wt.% carbon and 10 to 14 wt.% manganese, whose industrial relevance is associated with the combination of high toughness, ductility and service-induced work hardening. The study was based on the analysis of papers and technical documents concerning chemical composition, microstructure, heat treatment, deformation mechanisms, tribological testing and applications in mining, crushing, railways and impact-loaded equipment. The literature shows that wear resistance cannot be understood only from the initial hardness of the alloy. It depends on the stability of the austenitic matrix, adequate carbide dissolution, grain size, controlled alloying additions and, above all, the severity of abrasive contact. Under sufficient impact and plastic deformation, the surface hardens progressively through twinning, dislocation multiplication and defect interaction, while the core remains tough. Under mild loading, however, this mechanism may not be fully activated. It is concluded that Hadfield steel remains technically relevant for crusher jaws, liners, railway parts and mining components, provided that its selection considers the actual conditions of manufacturing, heat treatment, abrasiveness, impact and maintenance.

Keywords: Hadfield steel; tribology; abrasive wear; work hardening; austenitic manganese steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um sistema tribológico com carga, interface, movimento relativo e ambiente 14
Figura 2 - Diferença entre abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos 15
Figura 3 - Representação do ensaio pino-disco e da superfície abrasiva 16
Figura 4 - Microestrutura de aço manganês austenítico encruado 18
Figura 5 - Subestrutura com maclas e defeitos em aço de alto manganês deformado 19
Figura 6 - Micrografias do aço Hadfield antes e após tratamento térmico 21
Figura 7 - Perda de massa em ensaio Miller para aços manganês com diferentes composições 22
Figura 8 - Influência do teor de carbono na taxa de desgaste abrasivo de aços Hadfield 23
Figura 9 - Micrografias ópticas de aço Hadfield base e dopagem com CeO_2 e Hf 25
Figura 10 - Superfície desgastada com riscos e sulcos típicos de desgaste abrasivo 30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica do aço Hadfield segundo ASTM A-128 17
Tabela 2 - Efeito da temperatura de austenitização na microestrutura do aço Hadfield 20
Tabela 3 - Composição de aços manganês fundidos avaliados em ensaio Miller 22
Tabela 4 - Dureza dos materiais de Kalandyk et al. após tratamento térmico 22
Tabela 5 - Síntese do efeito do teor de carbono observado por Oliveira 24
Tabela 6 - Critérios de seleção do aço Hadfield para aplicações abrasivas 28
Tabela 7 - Síntese dos fatores que controlam o desempenho tribológico do aço Hadfield 30
Tabela 8 - Comparação crítica dos principais experimentos utilizados na revisão 32
Tabela 9 - Relação entre mecanismo abrasivo, resposta microestrutural e consequência prática 33
Tabela 10 - Leitura dos resultados de Oliveira (2016) para seleção de aço Hadfield 35
Tabela 11 - Efeito da austenitização observado por Wahyudi et al. (2023) 36
Tabela 12 - Efeitos metalúrgicos associados à temperatura de vazamento em aço manganês 37
Tabela 13 - Efeito esperado de elementos e dopagem no aço Hadfield 39
Tabela 14 - Matriz de seleção prática para o aço Hadfield 40
Tabela 15 - Plano experimental sugerido para estudos futuros 42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 OBJETIVOS 12
2.1 Objetivo geral 12
2.2 Objetivos específicos 12
3 METODOLOGIA 13
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
4.1 Tribologia e desgaste abrasivo 13
4.2 Ensaios tribológicos empregados na literatura 15
4.3 Composição e características gerais do aço Hadfield 16
4.4 Encruamento, maclação e mecanismos de deformação 18
4.5 Tratamento térmico e dissolução de carbonetos 19
4.6 Elementos de liga e modificação microestrutural 21
4.7 Teor de carbono e resistência ao desgaste 23
4.8 Temperatura de fusão, vazamento e segregação 24
4.9 Tamanho de grão e dopagem 24
4.10 Usinagem, soldagem e manutenção 26
5 APLICAÇÕES PARA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO 27
5.1 Mineração, britagem e processamento de rochas 27
5.2 Ferrovias e componentes de impacto 27
5.3 Critérios de seleção 28
6 DISCUSSÃO TEÓRICA INTEGRADA 29
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 44
REFERÊNCIAS 45

1 INTRODUÇÃO

A tribologia é o estudo dos fenômenos que surgem quando duas superfícies interagem sob movimento relativo. Atrito, desgaste e lubrificação não são fenômenos isolados; eles definem a forma como um componente mecânico perde material, dissipa energia e preserva ou não sua função ao longo do tempo. Em equipamentos de mineração, britagem, transporte de minério, terraplenagem, ferrovias e processamento de materiais granulares, o desgaste abrasivo aparece com frequência como um dos modos de falha mais críticos, pois partículas duras permanecem em contato contínuo com superfícies metálicas e removem material progressivamente.

É nesse cenário que o aço manganês Hadfield mantém sua relevância técnica. A liga, associada historicamente à composição aproximada Fe-12Mn-1,2C, apresenta matriz austenítica, elevada tenacidade e uma capacidade incomum de endurecer quando deformada. Ao contrário de materiais projetados para resistir ao desgaste apenas por elevada dureza inicial, o Hadfield depende de uma resposta em serviço: sob impacto e deformação plástica, a superfície endurece (encruamento), enquanto o interior conserva ductilidade suficiente para resistir à fratura. Essa combinação explica sua presença em mandíbulas de britadores, revestimentos de moinhos, martelos, dentes de escavadeiras, cruzamentos ferroviários e outros componentes submetidos simultaneamente a abrasão e impacto.

A ampla utilização do aço Hadfield, entretanto, não significa desempenho superior em qualquer condição. A literatura mostra que sua vida útil é sensível à composição química, ao teor de carbono e manganês, ao tamanho de grão, à presença e distribuição de carbonetos, à temperatura de vazamento, ao tratamento térmico de solubilização, à velocidade de resfriamento e à severidade do contato. Em solicitações de baixa energia, a camada encruada pode se formar lentamente ou nem se desenvolver em espessura suficiente. Nesses casos, o material pode perder competitividade para ligas de maior dureza inicial, como ferros fundidos brancos ou aços martensíticos.

Os trabalhos utilizados nesta revisão analisam o aço manganês por diferentes caminhos. Há estudos sobre a influência de elementos de liga e da microestrutura no desgaste abrasivo em ensaio Miller; pesquisas sobre tratamento térmico, usinagem e soldagem; documentos técnicos que discutem aplicações e limitações segundo a especificação ASTM A-128; investigações sobre o efeito da temperatura de austenitização, da temperatura de vazamento, do teor de carbono, do tamanho de grão e de dopantes como CeO_2 e Hf. Essa diversidade permite tratar o

Hadfield não apenas como uma composição química, mas como um material cujo desempenho nasce da relação entre processo, microestrutura e serviço.

Assim, este Projeto Final de Curso organiza e discute a literatura disponível sobre a tribologia do aço manganês Hadfield, com atenção aos mecanismos de encruamento, às variáveis metalúrgicas de processamento e às aplicações em que a resistência ao desgaste abrasivo se torna mais relevante. A abordagem é teórica, mas procura manter vínculo com problemas práticos de engenharia: seleção de materiais, especificação de peças fundidas, tratamento térmico, manutenção e interpretação de resultados de ensaios laboratoriais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar, a partir de revisão bibliográfica e discussão teórica, a relação entre a tribologia do aço manganês Hadfield e sua resistência ao desgaste abrasivo, considerando composição química, microestrutura, tratamento térmico, mecanismos de encruamento e aplicações industriais.

2.2 Objetivos específicos

- apresentar os fundamentos de tribologia e os principais mecanismos de desgaste abrasivo associados a partículas duras;
- caracterizar o aço Hadfield quanto à composição típica, matriz austenítica, formação de carbonetos e tratamento térmico de solubilização;
- discutir o encruamento por deformação e sua relação com maclação, discordâncias e mecanismos TWIP/TRIP em aços de alto manganês;
- comparar resultados da literatura sobre teor de carbono, tamanho de grão, elementos de liga, temperatura de vazamento e dopagem;
- indicar aplicações industriais em que o aço Hadfield tende a apresentar bom desempenho e situações nas quais sua escolha deve ser avaliada com cautela.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada é bibliográfica, descritiva e analítica. O trabalho foi construído a partir dos artigos, dissertação e documentos técnicos disponibilizados, selecionando as informações diretamente relacionadas à tribologia do aço manganês Hadfield, ao desgaste abrasivo e aos mecanismos metalúrgicos responsáveis por sua resposta em serviço.

Na primeira etapa, os materiais consultados foram agrupados por tema: fundamentos de tribologia e desgaste abrasivo; composição e propriedades do aço Hadfield; tratamento térmico, fundição e carbonetos; mecanismos de deformação e encruamento; e aplicações industriais. Em seguida, foram extraídos dados de composição química, dureza, temperatura de tratamento, tamanho de grão, taxa de desgaste, micrografias e descrições de mecanismos de falha.

A discussão foi conduzida a partir da ideia de sistema tribológico. Desse modo, cada propriedade do material foi interpretada em função da carga, do movimento relativo, da presença de abrasivo, do impacto, da temperatura, da geometria de contato e do ambiente. Esse cuidado é necessário porque o aço Hadfield não responde apenas como material de alta resistência, mas como uma liga que precisa ser ativada pela deformação para desenvolver plenamente sua camada endurecida.

A estrutura textual segue o modelo recomendado para Trabalhos de Conclusão de Curso da UNESP Sorocaba, com elementos pré-textuais, capítulos numerados, figuras, tabelas, discussão integrada e referências. As imagens e tabelas provenientes da literatura foram empregadas como apoio à análise, sempre acompanhadas de indicação de fonte.

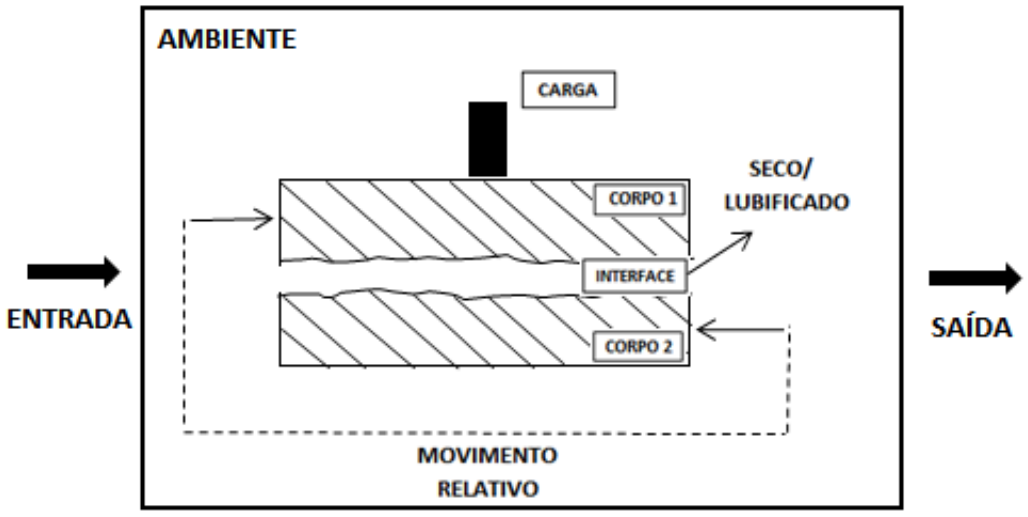
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Tribologia e desgaste abrasivo

A tribologia descreve as interações que ocorrem nas superfícies quando há contato e movimento relativo. Na prática, o desgaste raramente depende de uma única variável. Carga normal, velocidade, rugosidade, dureza relativa, presença de partículas, lubrificação, temperatura e meio ambiente atuam simultaneamente. Por isso, o desempenho de uma liga resistente ao desgaste só pode ser compreendido quando se considera o conjunto formado por corpo, contra-corpo, abrasivo e condição de operação.

Em um sistema tribológico, a taxa de desgaste não é definida apenas pela composição do material. O mesmo aço pode apresentar comportamentos distintos quando muda a pressão de contato, o tipo de abrasivo ou a forma de movimento. A Figura 1 ilustra essa ideia ao representar a interface submetida a carga e movimento relativo. O material, nesse caso, é apenas um dos elementos do sistema; o resultado final depende da interação entre todos eles.

Figura 1 - Representação de um sistema tribológico com carga, interface, movimento relativo e ambiente

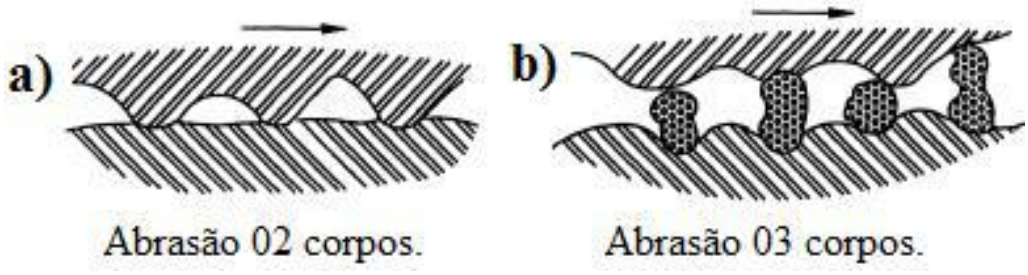


Fonte: Oliveira (2016).
Legenda: Esquema de um ambiente representado por um retângulo com seta fora para direita na esquerda e direita do retângulo. Dentro do retângulo são representados os corpos, carga e o movimento relativo com uma interface seca ou lubrificada.

O desgaste abrasivo ocorre quando asperidades ou partículas rígidas penetram na superfície e removem material por microcorte, microsulcamento, microfadiga ou fratura local. Na abrasão a dois corpos, o abrasivo permanece preso ou fixo em uma das superfícies e corta a outra de maneira mais direta, como mostra a alternativa a) na Figura 2 abaixo. Na abrasão a três corpos, as partículas ficam livres entre as superfícies e podem rolar, deslizar ou impactar,

produzindo um dano mais variável e, em muitos casos, menos previsível, representado na alternativa b) da Figura 2.

Figura 2 - Diferença entre abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos



Fonte: Oliveira (2016).
Legenda: À esquerda, imagem de dois corpos com atrito e movimento relativo entre eles. À direita, imagem de dois corpos com terceiros corpos entre eles.

A equação de Archard é frequentemente utilizada como primeira aproximação para relacionar volume desgastado, carga aplicada, distância de deslizamento e dureza. Embora útil, essa formulação não descreve integralmente materiais que mudam de estado durante o ensaio. No aço Hadfield, a dureza inicial não representa toda a resposta ao desgaste, pois a superfície pode endurecer à medida que é deformada. Assim, a análise precisa considerar a evolução microestrutural durante o próprio contato abrasivo.

Essa característica torna o Hadfield um caso particular dentro dos materiais resistentes ao desgaste. A superfície não permanece passiva: ela pode se transformar mecanicamente, acumulando defeitos cristalinos e elevando sua dureza. O desafio é que essa resposta depende do nível de esforço ou impacto. Quando o contato é suficientemente energético, a camada endurecida se forma e protege a peça; quando a energia é baixa, a remoção de material pode ocorrer antes que o encruamento atinja efeito relevante.

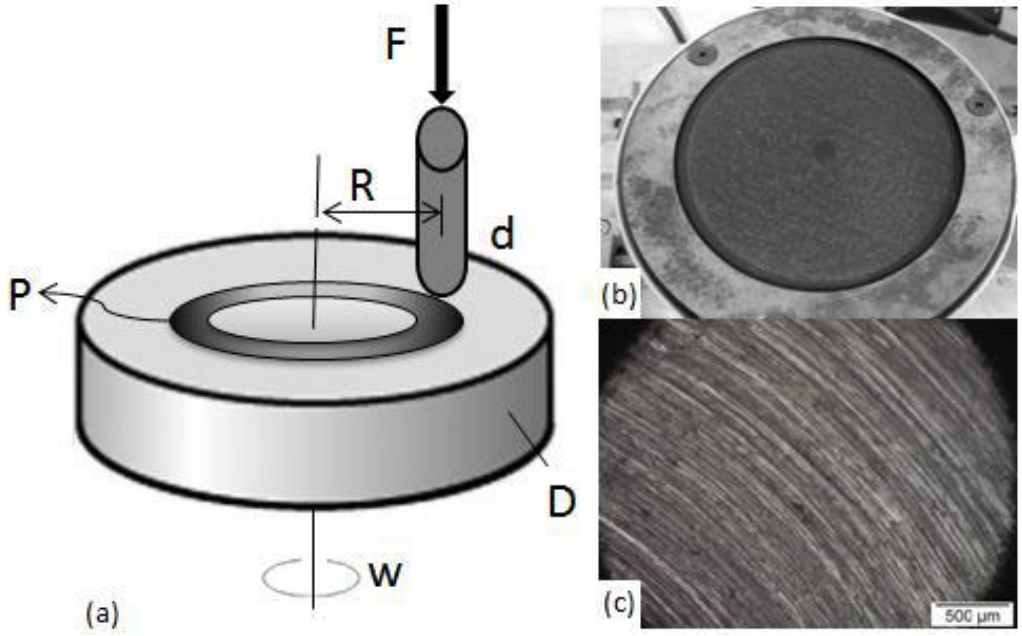
4.2 Ensaios tribológicos empregados na literatura

Os estudos consultados empregam diferentes métodos para avaliar o desgaste abrasivo. Cada ensaio reproduz apenas parte das condições reais de serviço, o que exige cuidado na comparação dos resultados. Ensaios como pino-disco permitem controlar carga, distância percorrida e granulometria abrasiva, sendo adequados para observar tendências de perda de massa e morfologia de superfície. Já ensaios como o Miller, que utiliza lama abrasiva, aproximam-se de situações em que partículas duras ficam suspensas em meio líquido.

Oliveira (2016) utilizou o ensaio pino-disco para comparar diferentes composições de aço Hadfield e avaliar a influência do teor de carbono e do tamanho do abrasivo. A Figura 3

apresenta a configuração do equipamento. Nesse tipo de ensaio, o pino é pressionado contra uma superfície abrasiva em movimento, permitindo medir a perda de massa e observar a superfície desgastada por microscopia.

Figura 3 - Representação do ensaio pino-disco e da superfície abrasiva



Fonte: Oliveira (2016).
Legenda: Representação do ensaio pino-disco à esquerda (a), foto de um disco após o ensaio (b) e figura microscópia da superfície do disco (c).

Kalandyk et al. (2015) adotaram outro caminho ao investigar a resistência ao desgaste em ensaio Miller, com mistura de carboneto de silício e água. Essa configuração envolve partículas abrasivas imersas em meio líquido, gerando um regime de desgaste diferente daquele observado no pino-disco. A comparação entre os métodos mostra que a resistência do aço Hadfield não deve ser descrita por um único número de dureza ou uma única taxa de desgaste; ela precisa ser interpretada dentro do regime tribológico em que foi medida.

4.3 Composição e características gerais do aço Hadfield

O aço Hadfield clássico é um aço manganês austenítico de alto carbono. Sua composição usual fica próxima de 1,0 a 1,4% de carbono e 10 a 14% de manganês, embora existam variações com elementos de liga. A elevada fração de manganês estabiliza a austenita à temperatura ambiente, enquanto o carbono contribui para resistência mecânica, encruamento e estabilidade da matriz. A Tabela 1 apresenta uma composição típica associada à especificação ASTM A-128.

O manganês exerce papel central ao manter a estrutura austenítica e reduzir a tendência de transformação prematura. O carbono, por sua vez, fortalece a matriz, mas exige controle rigoroso: em excesso ou mal solubilizado, pode formar carbonetos em contornos de grão, diminuindo ductilidade e resistência ao impacto. Dessa forma, o desempenho do aço Hadfield depende menos de um teor isolado de elemento químico e mais do equilíbrio entre composição, solidificação e tratamento térmico.

Tabela 1 - Composição típica do aço Hadfield segundo ASTM A-128

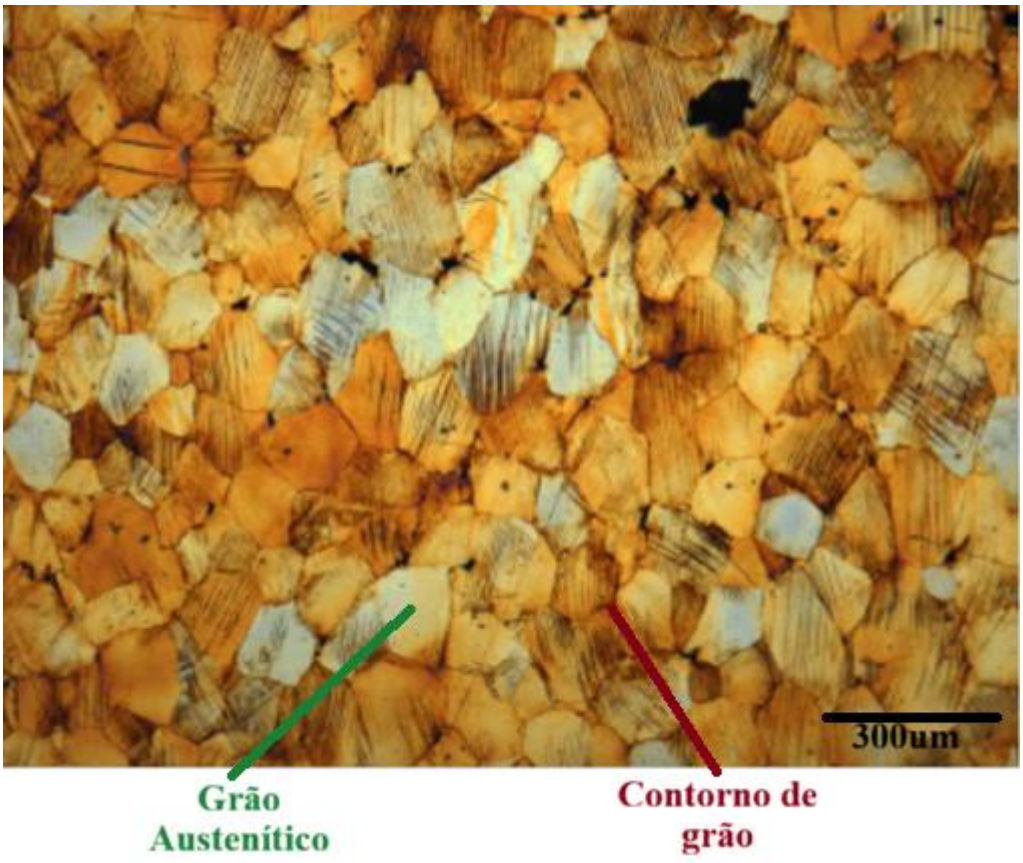
Elemento	Faixa ou limite (% em massa)	Função principal
C	1,0 a 1,4	Aumenta resistência, participa do encruamento e influencia carbonetos
Mn	10 a 14	Estabiliza a austenita e favorece tenacidade
Si	até 1,0	Desoxidante e elemento de solução sólida
P	até 0,07	Impureza controlada; excesso fragiliza contornos de grão
Fe	Balanço	Matriz metálica da liga

Fonte: adaptado de Zellagui et al. (2022).

Após o tratamento térmico adequado, a microestrutura desejada é predominantemente austenítica, com carbonetos prejudiciais dissolvidos tanto quanto possível. Na condição bruta de fundição, contudo, podem existir carbonetos do tipo (Fe,Mn)3C, segregações e produtos de transformação associados ao resfriamento lento. A solubilização seguida de têmpera em água busca justamente dissolver essas fases frágeis e reter carbono e manganês em solução sólida.

A Figura 4 mostra uma microestrutura de aço manganês austenítico encruado. As linhas internas observadas nos grãos estão associadas à deformação e à maclação, fenômenos ligados ao endurecimento superficial. A imagem evidencia uma característica essencial do Hadfield: sua microestrutura de interesse não é apenas a obtida após a fabricação, mas também aquela que se desenvolve durante o trabalho.

Figura 4 - Microestrutura de aço manganês austenítico encruado. Microscopia óptica.



Fonte: Acme Alloys (s.d.).

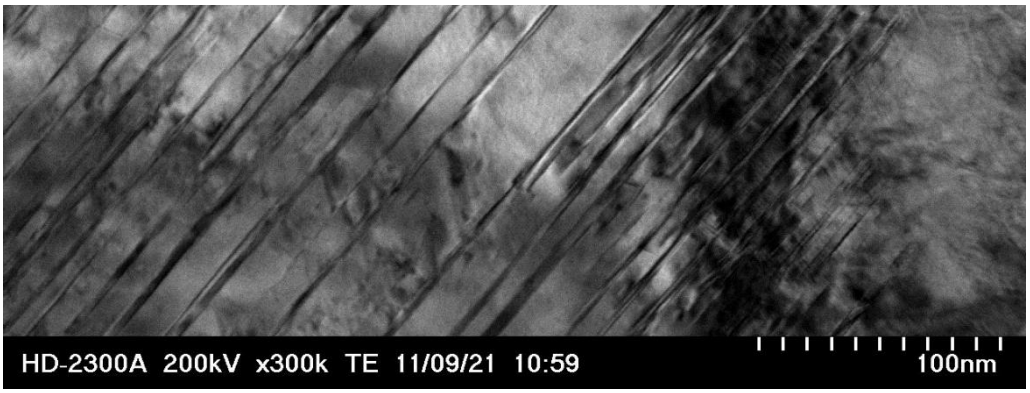
4.4 Encruamento, maclação e mecanismos de deformação

A resistência ao desgaste do aço Hadfield está diretamente ligada ao encruamento. Sob impacto ou deformação plástica, a superfície acumula discordâncias, forma maclas de deformação e passa a oferecer maior resistência ao avanço de novos defeitos. As maclas subdividem os grãos e atuam como barreiras adicionais ao movimento de discordâncias, elevando a dureza local. Enquanto isso, o núcleo, menos deformado, mantém a tenacidade necessária para absorver energia.

Nos aços de alto manganês, os mecanismos de deformação dependem da energia de falha de empilhamento. Em determinadas faixas, a maclação induzida por deformação, conhecida como efeito TWIP, tem papel importante. Em energias muito baixas, podem ocorrer transformações martensíticas induzidas por deformação, associadas ao efeito TRIP. Jabłońska e Śmiglewicz (2013) mostram que a análise de subestruturas por microscopia eletrônica permite observar emaranhados de discordâncias, maclas e micromaclas, revelando os mecanismos predominantes em cada condição, como mostra a Figura 5 abaixo.

Wen et al. (2014) chamam atenção para uma limitação importante do Hadfield clássico: sua elevada capacidade de encruamento aparece com maior intensidade sob grandes deformações, mas pode ser limitada em baixos impactos. Esse aspecto ajuda a explicar por que a liga tem ótimo desempenho em britadores e cruzamentos ferroviários, onde há impacto repetitivo, e desempenho menos favorável em deslizamento leve com partículas finas, no qual a energia disponível para endurecer a superfície é menor.

Figura 5 - Subestrutura com maclas e defeitos em aço de alto manganês deformado



Fonte: Jabłońska e Śmiglewicz (2013).

A literatura costuma discutir duas explicações complementares para o encruamento irregular do Hadfield. Uma delas enfatiza a maclação mecânica e a subdivisão dos grãos; a outra destaca o envelhecimento dinâmico por deformação e a interação entre átomos intersticiais de carbono e discordâncias. Na prática, os resultados indicam a ação simultânea de diferentes mecanismos, com participação variável conforme composição, temperatura, taxa de deformação e condição inicial da microestrutura. Para a engenharia, o ponto decisivo é relacionar a resistência ao desgaste à capacidade de formar uma camada encruada estável em trabalho.

4.5 Tratamento térmico e dissolução de carbonetos

O tratamento térmico mais importante do aço Hadfield é a solubilização da austenita seguida de resfriamento rápido em água. Peças na condição bruta de fundição tendem a conter carbonetos em contornos de grão, principalmente quando possuem grande seção ou resfriam lentamente no molde. Esses carbonetos podem facilitar a nucleação e propagação de trincas, reduzindo ductilidade e resistência ao impacto. A solubilização procura dissolvê-los, mas temperatura e tempo devem ser controlados para evitar crescimento excessivo de grão, oxidação, descarbonetação ou fusão incipiente.

Wahyudi et al. (2023) avaliaram taxas de aquecimento de 3, 6 e 10 °C/min e temperaturas de austenitização de 1000, 1100, 1150 e 1200 °C. Observou-se redução de carbonetos com o aumento da temperatura, acompanhada de crescimento de grão e queda de dureza. A amostra bruta de fundição apresentou 227,8 HV30, enquanto a menor dureza, 176,7 HV30, foi registrada na condição aquecida a 1200 °C e temperada em água. O resultado mostra que a eliminação de carbonetos pode diminuir a dureza inicial, mas ao mesmo tempo favorecer tenacidade e preparar a matriz para encruar em serviço.

A Tabela 2 sintetiza os dados mais relevantes desse estudo. Ela evidencia o compromisso entre dissolução de carbonetos e crescimento de grão. Em termos práticos, o tratamento deve remover carbonetos prejudiciais sem produzir grãos excessivamente grosseiros, pois o aumento exagerado do tamanho de grão pode comprometer propriedades mecânicas e estabilidade dimensional.

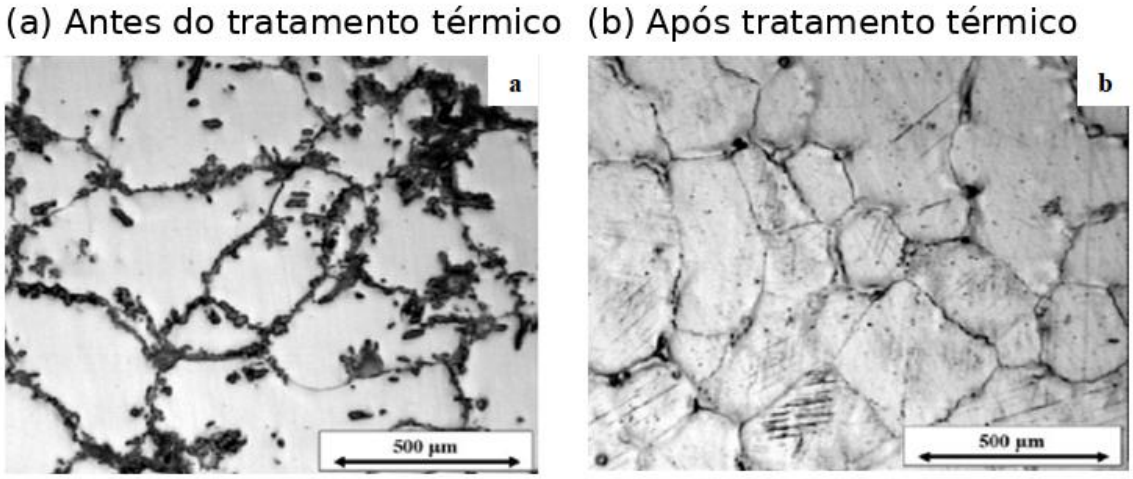
Tabela 2 - Efeito da temperatura de austenitização na microestrutura do aço Hadfield

Condição	Temperatura (°C)	Tamanho de grão médio	Dureza / observação
Bruta de fundição	-	224,6 μm	227,8 HV30; presença de carbonetos
S1	1000	323,3 μm	redução parcial de carbonetos
S2	1100	409,2 μm	maior dissolução de carbonetos
S3	1150	1014,4 μm	crescimento expressivo de grão
S4	1200	881,6 μm	176,7 HV30; menor dureza observada

Fonte: adaptado de Wahyudi et al. (2023).

A Figura 6 em sequência mostram micrografias antes e após o tratamento térmico. As micrografias de Zellagui et al. (2022) reforçam a influência do tratamento térmico sobre a distribuição de carbonetos e sobre a homogeneidade da matriz. Antes da solubilização, carbonetos e segregações em contornos de grão são mais evidentes. Depois do tratamento, a matriz tende a apresentar caráter austenítico mais uniforme. Essa uniformidade é necessária para preservar tenacidade e permitir que o encruamento se desenvolva de maneira controlada durante a abrasão com impacto.

Figura 6 - Micrografias do aço Hadfield antes e após tratamento térmico



Fonte: Zellagui et al. (2022).

4.6 Elementos de liga e modificação microestrutural

A composição do aço Hadfield pode ser ajustada com elementos como Cr, Ni, Mo, Ti, V e Nb, desde que se conheça o efeito esperado de cada adição. O níquel estabiliza a austenita e pode favorecer a tenacidade, mas não atua como forte formador de carbonetos. O cromo pode elevar a resistência ao desgaste por meio de fases carbídicas, embora carbonetos contínuos em contornos de grão prejudiquem a tenacidade. Titânio, vanádio e nióbio formam carbonetos ou carbonitretos estáveis e podem contribuir para refino de grão e reforço da matriz, desde que sua distribuição seja controlada.

Kalandyk et al. (2015) estudaram aços de alto manganês com adições de Cr, Ni e Ti em ensaio Miller com mistura de SiC e água. Os resultados indicaram que elementos formadores de carbonetos podem melhorar a resistência ao desgaste abrasivo quando originam fases complexas e estáveis na matriz austenítica. As adições de Cr e Ti, em especial, elevaram a dureza e reduziram a perda por desgaste. A Tabela 3 apresenta as composições avaliadas, enquanto a Tabela 4 resume os valores de dureza após solubilização.

Tabela 3 - Composição de aços manganês fundidos avaliados em ensaio Miller

Amostra	Grau	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Outro elemento
A	GX120Mn13	1,34	11,0	1,04	0,07	0,02% Ni
B	GX120Mn13	1,13	12,7	0,60	0,02	0,82% Ni
C	GX120Mn13	1,20	13,0	2,40	0,20	1,5% Ti
D	GX120MnCr18-2	1,28	17,6	0,51	2,20	0,09% Ni

Fonte: adaptado de Kalandyk et al. (2015).

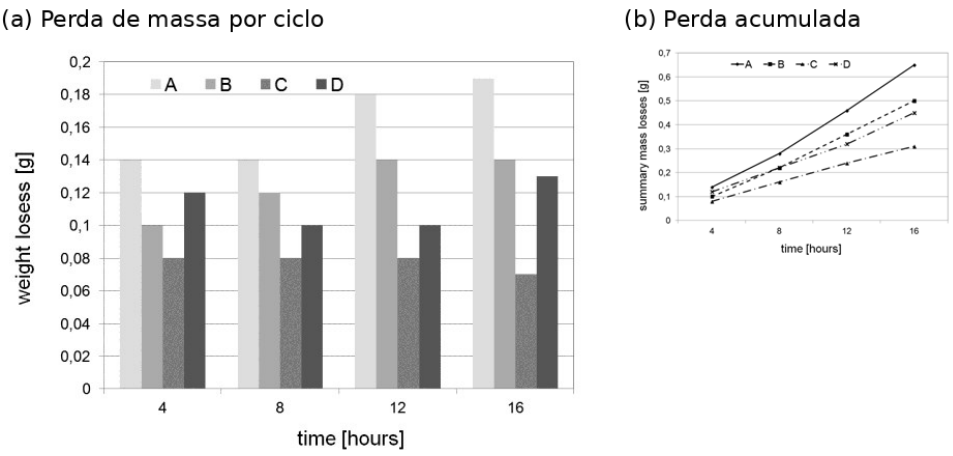
Tabela 4 - Dureza dos materiais de Kalandyk et al. após tratamento térmico

Material	Dureza (HB)	Microdureza da matriz (µHV20)	Microdureza de carbonetos (µHV20)
A	205	420	-
B	198	420	-
C	256	490	3600 a 4000
D	243	460	1400 a 1600

Fonte: adaptado de Kalandyk et al. (2015).

A Figura 7 em seguida mostra o comportamento do material ao longo do tempo, onde o gráfico de barras mostra a perda de massa por ciclo e o gráfico de linhas mostra a perda acumulada, que ajuda a comparar qual composição resiste melhor ao desgaste depois de vários ciclos. Quando uma curva cresce mais rápido, significa que aquele material está perdendo massa com maior velocidade.

Figura 7 - Perda de massa em ensaio Miller para aços manganês com diferentes composições



Fonte: Kalandyk et al. (2015).

Os resultados sugerem duas rotas de melhoria: o endurecimento da própria matriz austenítica e a presença de fases duras dispersas. Nenhuma delas, porém, deve ser analisada separadamente da tenacidade. Carbonetos grosseiros ou contínuos em contornos de grão podem iniciar trincas e reduzir a resistência ao impacto. Por isso, o uso de elementos de liga deve buscar equilíbrio entre resistência ao microcorte e capacidade de absorver energia.

4.7 Teor de carbono e resistência ao desgaste

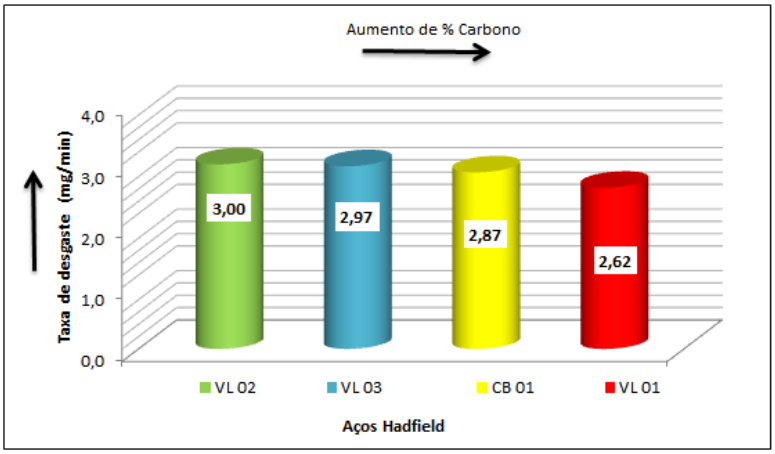
O carbono é um dos elementos mais decisivos no aço Hadfield. Ele fortalece a austenita e participa dos mecanismos de encruamento, mas também favorece a formação de carbonetos quando não permanece em solução. Oliveira (2016) comparou aços Hadfield com diferentes teores de carbono em ensaio pino-disco, utilizando abrasivos de granulometrias distintas. Nas condições avaliadas, as amostras com maior teor de carbono apresentaram menor taxa de desgaste. A Figura 8 reúne a tabela experimental e o gráfico de taxa de desgaste extraídos do estudo.

Figura 8 - Influência do teor de carbono na taxa de desgaste abrasivo de aços Hadfield

(a) Dados de ensaio pino-disco

AÇO	% Carbono	% Manganês	PERDA MASSA (mg)	TAXA DESGASTE (mg/min)
VL 02	1,00	9,66	5,29 ± 0,12	3,00 ± 0,07
VL 03	1,10	10,10	5,25 ± 0,12	2,97 ± 0,07
CB 01	1,40	9,66	5,06 ± 0,16	2,87 ± 0,09
VL 01	1,50	9,36	4,64 ± 0,07	2,62 ± 0,04

(b) Taxa de desgaste por composição



Fonte: Oliveira (2016).

Na série analisada por Oliveira (2016), o aço VL 01, com 1,50% C, apresentou taxa de desgaste de 2,62 mg/min, enquanto o VL 02, com 1,00% C, apresentou 3,00 mg/min. O resultado não deve ser generalizado sem considerar as demais variáveis, mas indica que o carbono pode favorecer a resistência ao desgaste quando a microestrutura está adequadamente tratada. O efeito positivo depende da solubilização, da distribuição de fases, da estabilidade da austenita e da severidade do ensaio.

Tabela 5 - Síntese do efeito do teor de carbono observado por Oliveira

Aço	Carbono (%)	Manganês (%)	Perda de massa (mg)	Taxa de desgaste (mg/min)
VL 02	1,00	9,66	5,29 ± 0,12	3,00 ± 0,07
VL 03	1,10	10,10	5,25 ± 0,12	2,97 ± 0,07
CB 01	1,40	9,66	5,06 ± 0,16	2,87 ± 0,09
VL 01	1,50	9,36	4,64 ± 0,07	2,62 ± 0,04

Fonte: adaptado de Oliveira (2016).

A relação entre maior teor de carbono e menor desgaste precisa ser lida com cautela. Se o aumento de carbono resultar em carbonetos frágeis nos contornos de grão, o ganho contra o microcorte pode vir acompanhado de perda de tenacidade. Em peças de britagem, trincas e lascamentos são tão prejudiciais quanto a perda gradual de massa. Portanto, o teor ótimo de carbono não é simplesmente o maior valor permitido, mas aquele que combina encruamento, resistência ao microcorte e segurança contra fratura.

4.8 Temperatura de fusão, vazamento e segregação

A rota de fundição tem influência direta sobre o desempenho do aço Hadfield. Balogun, Esezobor e Agunsoye (2008) estudaram o efeito da temperatura de fusão e vazamento sobre a segregação de carbonetos e o comportamento de desgaste de aços manganês austeníticos usados em mandíbulas de britador. Temperaturas elevadas aumentam a fluidez e podem facilitar o preenchimento do molde, mas também favorecem segregações, formação de produtos frágeis e distribuição irregular de carbonetos.

Segundo os autores, temperaturas muito altas intensificam micro e macrosegregações, sobretudo nos contornos de grão. Essas regiões podem dificultar o movimento de discordâncias, mas também se comportar como zonas frágeis, favorecendo desgaste irregular e falhas localizadas. A escolha da temperatura de vazamento deve, portanto, equilibrar fluidez, alimentação, solidificação, tamanho de grão e distribuição de fases.

Esse aspecto ganha importância em peças fundidas de grande porte, como mandíbulas, mantos e revestimentos. Em seções espessas, o resfriamento lento facilita a precipitação de carbonetos e o crescimento de grão. Mesmo após tratamento térmico, parte da heterogeneidade inicial pode permanecer. A qualidade da fundição deve ser entendida, portanto, como uma condição metalúrgica para o desempenho tribológico, e não apenas como uma etapa de fabricação.

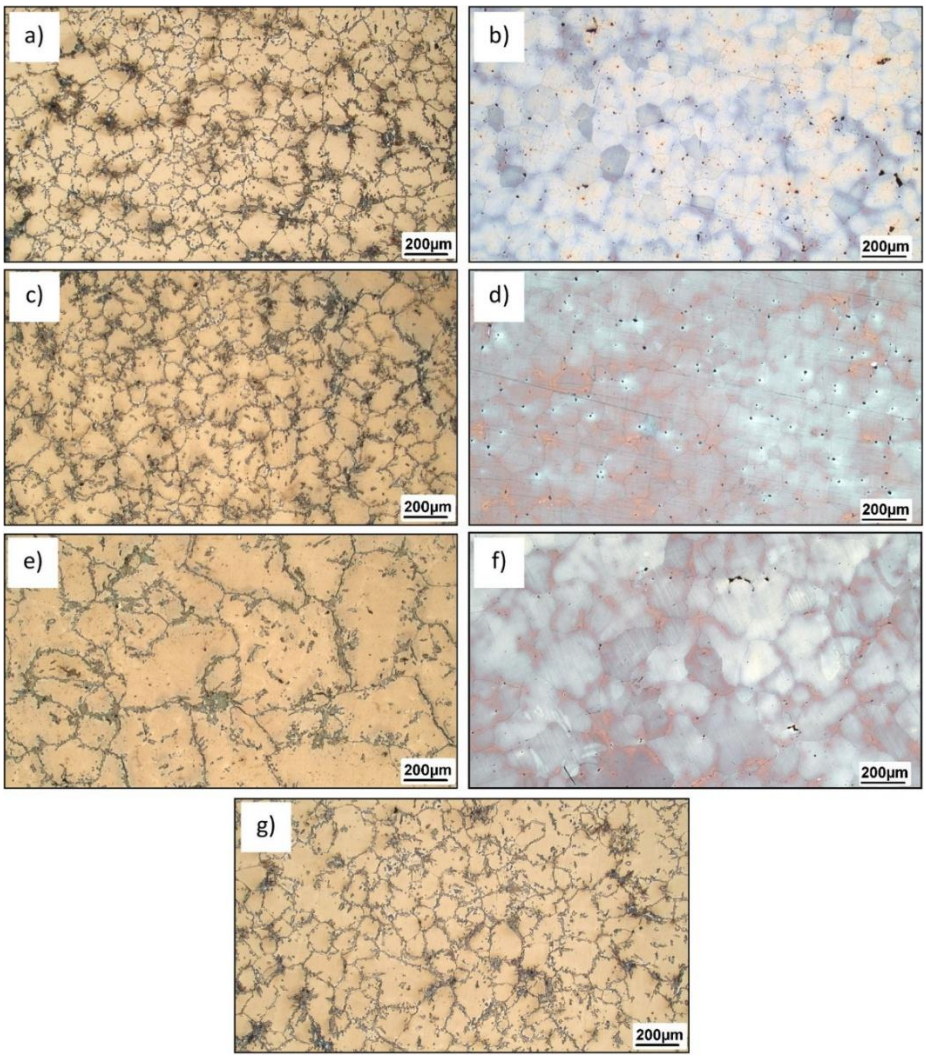
4.9 Tamanho de grão e dopagem

O tamanho de grão da austenita influencia limite de escoamento, resistência ao impacto, ductilidade, taxa de encruamento e desgaste. Grãos grosseiros favorecem concentração de

deformação e podem facilitar propagação de trincas. Astaf'ev (1997) investigou o aço manganês austenítico 110G13L e mostrou que a estrutura de grão afeta propriedades mecânicas, intensidade de encruamento e resistência à abrasão sob impacto. O refino de grão surge, portanto, como uma rota importante para aumentar a confiabilidade em serviço.

Sajjadi et al. (2024) avaliaram a adição de CeO_2 e Hf como dopantes em aço Hadfield fundido. A proposta foi estimular a nucleação heterogênea, reduzir tamanho de grão, segregações e microporosidades. Os autores relataram aumento de dureza de 80,95% e aumento da energia de impacto Charpy de 19,29% com CeO_2 e 45,61% com Hf, após tratamento térmico, sem alteração significativa nas propriedades de tração. A Figura 9 apresenta micrografias ópticas do aço base e das condições dopadas, onde os items a) e b) mostram o metal base sem dopagem; c) e d) com dopagem de 0,1% de CeO_2; e) e f) com dopagem de 0,05% de Hf; g) com 0,05% de CeO_2; sendo que b), d) e f) mostram micrografia óptica após o tratamento térmico.

Figura 9 - Micrografias ópticas de aço Hadfield base e dopado com CeO_2 e Hf



Fonte: Sajjadi et al. (2024).

A dopagem representa uma estratégia moderna para enfrentar uma limitação recorrente do Hadfield: o controle do tamanho de grão em peças fundidas grandes. Sua aplicação industrial, entretanto, exige rigor na dosagem, dispersão e interação dos dopantes com inclusões e carbonetos. Um dopante eficaz deve formar núcleos estáveis na temperatura de vazamento, apresentar compatibilidade cristalográfica com a austenita e não introduzir inclusões prejudiciais ao desempenho.

4.10 Usinagem, soldagem e manutenção

A mesma capacidade de encruamento que torna o aço Hadfield eficiente em serviço dificulta sua usinagem. Durante o corte, a camada superficial pode endurecer rapidamente, aumentando o desgaste da ferramenta e exigindo parâmetros específicos. Zellagui et al. (2022) discutem alternativas como usinagem a quente e processos não convencionais para contornar a baixa usinabilidade. Em manutenção, soldagem e reparo também exigem atenção, pois aquecimentos inadequados podem favorecer carbonetos e fragilizar a região afetada.

Na soldagem, a zona termicamente afetada pode sofrer mudanças microestruturais capazes de reduzir a tenacidade. Por isso, recomenda-se limitar o aporte térmico, evitar exposição prolongada a temperaturas críticas e selecionar consumíveis compatíveis. Em peças de desgaste, o reparo por solda não deve considerar apenas a recuperação geométrica; é necessário avaliar se a microestrutura final continuará resistindo à abrasão e ao impacto. Uma peça reparada incorretamente pode falhar cedo por carbonetos frágeis, tensões residuais ou trincas.

A limpeza e o acabamento de peças fundidas também merecem atenção. Documentos técnicos sobre aço manganês austenítico indicam que rebarbação, corte e acabamento são operações difíceis justamente pela elevada tenacidade e pelo encruamento. Esses fatores aumentam custo e tempo de fabricação, mas fazem parte do compromisso técnico do material: a mesma liga que resiste ao impacto em serviço também resiste às operações de remoção de material na produção.

5 APLICAÇÕES PARA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO

5.1 Mineração, britagem e processamento de rochas

As aplicações mais tradicionais do aço Hadfield concentram-se na mineração e no processamento de rochas. Mandíbulas de britadores, cones, mantos, revestimentos, martelos, barras de impacto, dentes de escavadeiras e componentes de manuseio de minério trabalham sob compressão, impacto e abrasão. Nesses casos, a liga encontra condição favorável para desenvolver uma camada superficial encruada. O contato repetido com rochas duras fornece energia para elevar a dureza da superfície, enquanto o núcleo tenaz reduz o risco de fratura catastrófica.

Em britadores de mandíbulas, por exemplo, a superfície é submetida a impactos e compressões alternadas. A camada encruada resiste ao microcorte, e a tenacidade evita lascamentos extensos. Quando o minério é muito abrasivo, mas a energia de impacto é baixa, como pode ocorrer em transporte ou escorregamento com partículas finas, o Hadfield pode não atingir o endurecimento necessário. Nessas situações, ferros fundidos brancos de alto cromo, aços martensíticos ou materiais revestidos podem apresentar desempenho competitivo.

A seleção do material depende, portanto, do balanço entre abrasão e impacto. Quanto maior a participação do impacto, maior tende a ser a vantagem do Hadfield. Quanto mais próximo o regime estiver de uma abrasão deslizante de baixa energia, maior será o peso da dureza inicial e da presença de carbonetos duros. Essa regra não substitui ensaios de campo, mas ajuda a orientar a escolha inicial de materiais.

5.2 Ferrovias e componentes de impacto

Na área ferroviária, o aço Hadfield é utilizado em cruzamentos, jacarés, agulhas e peças sujeitas ao impacto roda-trilho. O carregamento repetitivo promove deformação superficial e encruamento, preservando resistência ao impacto. A matriz austenítica contribui para evitar fratura frágil, requisito indispensável em aplicações de segurança. Nesses componentes, o controle de desgaste deve caminhar junto com o controle da deformação plástica e da manutenção dimensional.

A liga também aparece em equipamentos sujeitos a impacto metálico, como fragmentadores, moinhos e alguns componentes de proteção. Em situações de desgaste metal-metal com tendência a engripamento (aumento de atrito e riscos através do desgaste adesivo), a capacidade de deformação da matriz austenítica pode ser vantajosa. Ambientes de temperatura

elevada, contudo, exigem avaliação específica, pois a estabilidade da austenita, a precipitação de carbonetos e a resistência mecânica podem ser alteradas.

5.3 Critérios de seleção

A Tabela 6 reúne critérios práticos para selecionar o aço Hadfield em ambientes abrasivos. De modo geral, a liga é mais indicada quando há impacto, compressão e possibilidade de encruamento; e menos indicada quando a solicitação se limita à abrasão fina, deslizante e de baixa carga.

Tabela 6 - Critérios de seleção do aço Hadfield para aplicações abrasivas

Condição de serviço	Adequação do Hadfield	Justificativa técnica
Abrasão com alto impacto	Alta	Impacto promove encruamento superficial e núcleo tenaz resiste à fratura
Abrasão por partículas finas com baixa carga	Moderada a baixa	Pode não ocorrer encruamento suficiente; dureza inicial é limitada
Choque mecânico intenso	Alta	Matriz austenítica oferece alta tenacidade
Ambiente com necessidade de usinagem precisa	Restrita	Encruamento dificulta corte e acabamento
Peças fundidas espessas	Dependente do processo	Risco de segregação, carbonetos e crescimento de grão
Contato com abrasivo duro e pouca deformação	Avaliar alternativas	Ligas com carbonetos duros podem apresentar menor desgaste

Fonte: elaborado pelo autor com base na revisão bibliográfica.

6 DISCUSSÃO TEÓRICA INTEGRADA

A leitura conjunta dos estudos mostra que a tribologia do aço Hadfield deve ser entendida como um problema integrado de material, processo e serviço. A liga não é simplesmente um aço duro. Sua resistência depende da capacidade de transformar deformação superficial em endurecimento. Assim, composição, tratamento térmico, tamanho de grão, carbonetos, elementos de liga e severidade do contato precisam ser analisados em conjunto.

A primeira variável é a composição química. O carbono aumenta a resistência da matriz e participa dos mecanismos de encruamento, mas pode gerar carbonetos indesejados quando não se mantém em solução. O manganês estabiliza a austenita, mas teores inadequados ou segregações reduzem a uniformidade microestrutural. Elementos como Cr, Ti, V, Nb e Mo podem melhorar a resistência ao desgaste, desde que as fases formadas não comprometam a tenacidade.

A segunda variável é o tratamento térmico. A condição bruta de fundição geralmente apresenta carbonetos e heterogeneidades que reduzem ductilidade. A solubilização e a têmpera em água procuram obter matriz austenítica homogênea, porém a temperatura deve ser escolhida com cuidado. Temperaturas baixas deixam carbonetos residuais; temperaturas elevadas favorecem crescimento de grão e podem reduzir a dureza inicial. O tratamento adequado é aquele que prepara a microestrutura para encruar de modo seguro em serviço.

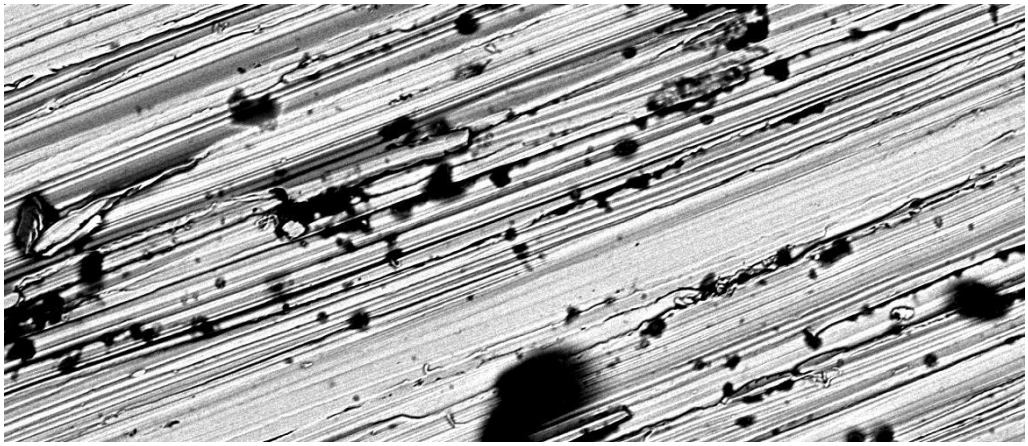
A terceira variável é a severidade tribológica. Em britagem, o alto nível de impacto ativa o encruamento e torna o Hadfield competitivo. Em abrasão fina, deslizante e de baixa carga, a superfície pode ser removida antes de endurecer o suficiente. A comparação com outros materiais deve considerar esse ponto. Um aço que parece inferior em dureza inicial pode ter excelente desempenho quando há impacto; por outro lado, pode ser inadequado em um regime de desgaste pouco severo.

A quarta variável é a escala da peça. Em laboratório, corpos de prova pequenos costumam receber tratamento térmico mais uniforme e apresentar menor heterogeneidade. Peças industriais espessas, ao contrário, têm gradientes térmicos, regiões de solidificação lenta, segregações e tensões residuais. Portanto, resultados laboratoriais devem ser transferidos para a prática com prudência, sobretudo quando se trata de mandíbulas, mantos, revestimentos e outros fundidos de grande seção.

A Figura 10 apresenta uma superfície desgastada por abrasão, com riscos e sulcos característicos. Essas marcas revelam a ação de partículas duras e confirmam que a resistência do material depende de sua capacidade de limitar microcorte e microsulcamento. No Hadfield,

essa limitação resulta da combinação entre encruamento superficial, tenacidade e estabilidade da matriz austenítica.

Figura 10 - Superfície desgastada com riscos e sulcos típicos de desgaste abrasivo



Fonte: Oliveira (2016).

A Tabela 7 resume os fatores metalúrgicos e tribológicos discutidos. Seu objetivo é reunir, em uma mesma leitura, as variáveis que controlam o desempenho do aço Hadfield em ambientes abrasivos.

Tabela 7 - Síntese dos fatores que controlam o desempenho tribológico do aço Hadfield

Fator	Efeito esperado	Risco quando mal controlado
Teor de carbono	Aumenta resistência, encruamento e pode reduzir desgaste	Carbonetos frágeis e perda de tenacidade
Teor de manganês	Estabiliza austenita e influencia energia de falha de empilhamento	Instabilidade de fase ou custo elevado
Carbonetos	Podem resistir ao microcorte quando dispersos	Fragilização em contornos de grão
Solubilização	Dissolve carbonetos e homogeneiza matriz	Crescimento de grão, descarbonetação ou dureza inicial menor
Refino de grão	Melhora tenacidade e estabilidade mecânica	Processo mais complexo ou inclusões indesejadas
Impacto em serviço	Ativa encruamento superficial	Deformação excessiva se geometria for inadequada
Abrasivo fino e baixa carga	Menor ativação de encruamento	Desgaste elevado frente a ligas mais duras

Fonte: elaborado pelo autor.

Do ponto de vista de projeto, o aço Hadfield deve ser tratado como um material de alta resistência potencial, e não como uma solução universal. Sua especificação é mais segura quando o componente recebe impacto suficiente para encruar. Em situações de abrasão com pouca deformação plástica, convém comparar alternativas de maior dureza inicial. A decisão técnica deve considerar não apenas taxa de desgaste, mas também risco de fratura, facilidade de manutenção, custo de parada e disponibilidade de fundição qualificada.

A revisão também mostra espaço para desenvolvimento. Dopagem com terras raras, microligação, controle refinado de tratamento térmico e combinações de ensaios de abrasão

com impacto podem ampliar o uso do Hadfield. Ainda assim, qualquer proposta de melhoria precisa preservar o que torna essa liga valiosa: a coexistência entre superfície capaz de endurecer e núcleo capaz de absorver energia.

Análise comparativa entre ensaios tribológicos e condições de solicitação

Os estudos analisados deixam claro que o comportamento tribológico do aço Hadfield muda conforme o tipo de ensaio. Essa constatação é central para evitar generalizações. Uma mesma liga pode apresentar bom resultado em um ensaio com impacto ou lama abrasiva e desempenho apenas mediano em abrasão deslizante de baixa carga. Por isso, os dados experimentais da literatura devem ser lidos a partir da condição de contato que cada método representa.

No ensaio pino-disco utilizado por Oliveira (2016), o contato é mais controlado e predominantemente deslizante. O abrasivo fixado à lixa remove material por microcorte e microsulcamento, sob carga e distância previamente definidas. Esse método é útil para comparar composições e granulometrias, mas não reproduz totalmente a condição de um britador, em que a peça recebe impactos, compressões não uniformes e renovação constante do abrasivo. Consequentemente, a taxa de desgaste obtida no pino-disco indica tendência, mas não deve ser convertida diretamente em vida útil de campo.

O ensaio Miller empregado por Kalandyk et al. (2015) segue outra lógica. A amostra trabalha em uma mistura de SiC e água, o que aproxima o ensaio de situações com partículas livres em meio líquido. Nessa condição, o desgaste envolve abrasão a três corpos, possível impacto de partículas e interação contínua com o fluido. O desempenho de aços modificados com Cr e Ti nesse ensaio mostra que carbonetos complexos e aumento de dureza podem contribuir para reduzir perda de massa, desde que a matriz mantenha tenacidade suficiente.

Estudos de tratamento térmico, como o de Wahyudi et al. (2023), não medem diretamente desgaste abrasivo, mas ajudam a explicar por que algumas microestruturas resistem melhor que outras. A dissolução de carbonetos, o crescimento de grão e a variação de dureza inicial definem a capacidade de o aço deformar sem trincar. Assim, a perda de dureza após solubilização não deve ser interpretada automaticamente como piora. Para o Hadfield, uma matriz mais homogênea e tenaz pode encruar melhor no serviço do que uma microestrutura inicialmente mais dura, porém frágil.

A análise de Balogun, Esezobor e Agunsoye (2008) aproxima a discussão da escala industrial. Temperatura de vazamento, segregação e distribuição de carbonetos influenciam diretamente mandíbulas de britadores. Esse tipo de peça não falha apenas por desgaste

uniforme; pode apresentar trincas, lascamentos, regiões superdesgastadas e variações locais de dureza. A fabricação, portanto, participa do desempenho tribológico tanto quanto a composição nominal.

Os trabalhos sobre dopagem e tamanho de grão ampliam essa interpretação. Sajjadi et al. (2024) mostram que CeO_2 e Hf podem reduzir grãos, segregações e microporosidades, elevando dureza e energia de impacto após tratamento térmico. Astaf'ev (1997) demonstra que o tamanho de grão afeta resistência mecânica, encruamento e abrasão sob impacto. Em conjunto, esses estudos reforçam que a microestrutura precisa ser pensada em diferentes escalas: contornos de grão, inclusões, carbonetos, camada encruada e geometria final da peça. A Tabela 8 abaixo mostram uma comparação dos principais autores e suas respectivas técnicas e condições exeperimentais utilizados nesta abordagem teórica.

Tabela 8 - Comparação crítica dos principais experimentos utilizados na revisão

Fonte	Condição experimental	Variáveis principais	Contribuição para a análise tribológica
Oliveira (2016)	Ensaio pino-disco com lixas abrasivas e análise por MEV	Teor de carbono, tamanho do abrasivo e carga aplicada	Relaciona perda por abrasão, encruamento superficial e marcas de microcorte/microssulcamento
Kalandyk et al. (2015)	Ensaio Miller em mistura SiC/água por ciclo de 16 h	Teor de Mn, Cr, Ni, Ti e dureza pós-tratamento	Mostra o efeito de carbonetos complexos e da matriz modificada na resistência à abrasão
Wahyudi et al. (2023)	Solubilização entre 1000 e 1200 °C com diferentes taxas de aquecimento	Temperatura, taxa de aquecimento, tamanho de grão e dureza	Evidencia o compromisso entre dissolução de carbonetos, crescimento de grão e dureza inicial
Balogun et al. (2008)	Fusão/vazamento em 1380, 1450 e 1550 °C e análise por EDX	Temperatura de fusão, segregação e distribuição de carbonetos	Demonstra que a fundição afeta a uniformidade de desgaste de mandíbulas de britadores
Sajjadi et al. (2024)	Dopagem com CeO_2 e Hf, tratamento térmico e ensaio Charpy	Refino de grão, inclusões, dureza e energia de impacto	Indica rotas de refino microestrutural para melhorar tenacidade e estabilidade em serviço
Astaf'ev (1997)	Aço 110G13L com diferentes tamanhos de grão	Tamanho de grão, encruamento e propriedades mecânicas	Mostra a importância do grão fino para distribuir deformação e reduzir fratura intergranular
Jabłońska e Śmiglewicz (2013)	Laminação a frio e análise por STEM em aços alto Mn	Energia de falha de empilhamento, maclas e discordâncias	Explica mecanismos de deformação que sustentam o encruamento em aços austeníticos de alto manganês

Fonte: elaborado pelo autor com base nos artigos analisados.

Interpretação mecanística: desgaste abrasivo versus encruamento

O ponto central para compreender o aço Hadfield é perceber que desgaste abrasivo e encruamento acontecem ao mesmo tempo e competem entre si. As partículas abrasivas tendem a remover material da superfície; a deformação provocada pelo contato tende a endurecer essa mesma superfície. O desempenho depende de qual processo prevalece. Quando a superfície encrua mais rapidamente do que é removida, a peça ganha resistência. Quando a remoção é

mais rápida que o endurecimento, o material se desgasta sem aproveitar plenamente sua principal vantagem.

Essa dinâmica cria uma condição de equilíbrio. Se a camada encruada se forma e permanece aderida ao substrato, ela atua como barreira ao microcorte. Se trinca, lasca ou é removida continuamente, o núcleo menos endurecido fica exposto e o desgaste acelera. Portanto, não basta formar uma camada dura; ela precisa ser compatível com a matriz, suportar impacto e se renovar durante o serviço.

A microestrutura controla essa competição. Uma matriz austenítica homogênea, livre de carbonetos contínuos em contornos de grão, tende a deformar de maneira mais distribuída. Essa condição favorece a multiplicação de discordâncias e a formação de maclas. Já uma microestrutura segregada, com grãos muito grosseiros ou fases frágeis, concentra tensão e pode gerar trincas. Nesse caso, o material perde parte da tenacidade que justifica sua aplicação em ambientes severos.

A energia de falha de empilhamento ajuda a explicar a forma como o aço se deforma. Em valores adequados, a maclação por deformação torna-se relevante, aumentando a taxa de encruamento. Em valores muito baixos, pode haver transformação martensítica induzida por deformação; em valores altos, prevalece o escorregamento de discordâncias. O aço Hadfield clássico se destaca porque combina austenita estável, carbono em solução e facilidade de formar subestruturas que dificultam o movimento de discordâncias.

O mecanismo pode ser resumido em uma sequência: o abrasivo entra em contato com a superfície; a carga gera deformação plástica; a microestrutura responde por discordâncias, maclas e eventual transformação local; a dureza superficial aumenta; e a nova superfície passa a resistir melhor ao corte. Se qualquer etapa for prejudicada por baixa carga, abrasivo fino, carbonetos frágeis ou grão grosseiro, o desempenho tende a cair. A Tabela 9 na sequência resume os diferentes tipos de mecanismo abrasivo e seus resultados no aço Hadfield

Tabela 9 - Relação entre mecanismo abrasivo, resposta microestrutural e consequência prática

Mecanismo dominante	Resposta do aço Hadfield	Condição favorável	Risco técnico
Microcorte	Remoção direta de material por partícula dura	Camada superficial previamente encruada ou carbonetos finos	Perda rápida quando a dureza inicial é baixa e a carga não encrua a superfície
Microssulcamento	Deslocamento lateral de material com deformação plástica	Matriz austenítica tenaz e capaz de endurecer	Acúmulo de deformação e destacamento se houver fadiga superficial
Impacto abrasivo	Alto encruamento por maclas e discordâncias	Britadores, cruzamentos ferroviários e revestimentos sob choque	Trincas se houver segregação ou carbonetos em contornos de grão
Abrasão por partículas finas	Menor ativação do encruamento	Cargas suficientes para deformar a superfície	Desempenho inferior a ligas de alta dureza inicial
Fadiga superficial	Camada endurecida pode trincar se houver dano acumulado	Boa tenacidade interna e microestrutura homogênea	Destacamento de fragmentos endurecidos e aumento da rugosidade

Fonte: elaborado pelo autor.

Influência do carbono e do tamanho do abrasivo nos resultados de pino-disco

O estudo de Oliveira (2016) é especialmente relevante para este PFC por tratar diretamente do desgaste abrasivo de aços Hadfield com diferentes teores de carbono. O ensaio pino-disco permitiu comparar perda de massa e taxa de desgaste sob condições controladas de carga, distância e granulometria. Embora não reproduza todos os efeitos de impacto presentes em serviço, o método isola variáveis importantes e oferece uma base objetiva para discutir a influência da composição.

Os resultados indicam que maiores teores de carbono tendem a reduzir a taxa de desgaste nas condições avaliadas. Esse comportamento pode ser associado ao fortalecimento da austenita e à maior resistência ao microcorte. Entretanto, o carbono só contribui positivamente quando permanece em solução ou em fases bem distribuídas. Se houver precipitação excessiva em contornos de grão, a mesma variável que melhora a resistência ao corte pode reduzir tenacidade e favorecer fratura.

A granulometria abrasiva acrescenta outra camada de análise. Partículas maiores produzem sulcos mais profundos e removem volume maior de material por passagem. Partículas menores podem gerar contato mais distribuído, mas também modificar a forma como a superfície encrua. O Hadfield responde de modo diferente conforme a energia aplicada por cada partícula, o que explica oscilações de dureza e de desgaste quando se alteram lixas, carga e distância.

As micrografias das superfícies desgastadas, marcadas por microssulcos e microcortes, confirmam a predominância de abrasão deslizante no ensaio. Essas marcas são importantes porque conectam o resultado numérico de perda de massa ao mecanismo físico de remoção. Em um material como o Hadfield, a superfície pós-ensaio deve ser lida junto com a dureza e a microestrutura, pois a taxa de desgaste sozinha não revela se o encruamento foi efetivamente ativado.

Do ponto de vista de engenharia, os resultados de pino-disco recomendam cautela na seleção apenas por composição. Aumentar carbono pode ser vantajoso para abrasão deslizante, mas o efeito deve ser confirmado por tratamento térmico adequado, controle de carbonetos e avaliação de impacto. Para componentes reais, a composição ótima precisa equilibrar desgaste, tenacidade e estabilidade dimensional.

Os resultados experimentais de Oliveira podem ser interpretados com base nos aspectos analisados com diversas variáveis do comportamento do aço manganês, como mostra a Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Leitura dos resultados de Oliveira (2016) para seleção de aço Hadfield

Aspecto analisado	Tendência observada	Interpretação técnica
Teor de carbono	Maiores teores reduziram o efeito do desgaste abrasivo	Carbono aumenta resistência e favorece maior capacidade de oposição ao microcorte
Encruamento	Aços com menor carbono apresentaram ganho de dureza significativo	Matriz mais deformável pode endurecer mais durante o contato
Tamanho do abrasivo	Diferentes granulometrias alteraram desgaste e endurecimento	A profundidade de penetração e o regime de microcorte dependem da partícula e da carga
Abrasivo #320	Foi observada oscilação no comportamento	Granulometria menor não garante resposta linear devido à complexidade do contato
Superfície desgastada	Presença de microssulcos e microcortes	Mecanismos abrasivos clássicos coexistem com encruamento superficial

Fonte: elaborado pelo autor com base em Oliveira (2016).

Tratamento térmico, carbonetos e crescimento de grão

O tratamento térmico do aço Hadfield é decisivo porque a condição bruta de fundição raramente apresenta a microestrutura desejada para serviço severo. Carbonetos intergranulares aumentam dureza local, mas reduzem ductilidade e podem funcionar como caminhos preferenciais de trinca. A solubilização busca dissolver essas fases e produzir uma matriz austenítica mais uniforme, capaz de deformar e encruar sem fraturar prematuramente.

Wahyudi et al. (2023) analisaram temperaturas de austenitização de 1000, 1100, 1150 e 1200 °C. Com o aumento da temperatura, o teor de carbonetos diminuiu, mas o tamanho de grão cresceu e a dureza caiu. A amostra bruta apresentou 227,8 HV30; a condição tratada a 1200 °C e temperada em água apresentou 176,7 HV30. Esses valores mostram que uma microestrutura aparentemente mais macia pode ser, na verdade, mais adequada para serviço com impacto, desde que ofereça tenacidade e capacidade de encruamento.

A queda de dureza após solubilização não deve ser interpretada isoladamente. Em materiais resistentes ao desgaste por dureza inicial, essa queda seria preocupante. No Hadfield, porém, a dureza útil é parcialmente criada durante a operação. Uma matriz austenítica limpa, mesmo menos dura no início, pode desenvolver camada encruada mais eficiente do que uma matriz contaminada por carbonetos frágeis.

A taxa de aquecimento também influencia o resultado. Aquecimentos lentos aumentam o tempo disponível para transformações e coalescimento de carbonetos; aquecimentos rápidos podem reduzir algumas precipitações, mas gerar gradientes térmicos. Em peças espessas, a escolha da taxa de aquecimento precisa considerar uniformidade térmica e risco de tensões internas. O tratamento térmico, portanto, deve ser ajustado à geometria da peça, não apenas à composição química.

Zellagui et al. (2022) reforçam que a temperatura de austenitização e a têmpera em água são essenciais para obter matriz austenítica adequada. Ainda assim, o processo deve evitar

permanência prolongada em faixas que favoreçam carbonetos e fragilização. Em termos práticos, controlar o tratamento térmico significa controlar a base sobre a qual o encruamento em serviço irá ocorrer.

Tabela 11 - Efeito da austenitização observado por Wahyudi et al. (2023)

Condição	Temperatura de austenitização	Dureza ou microestrutura reportada	Interpretação para o desgaste
Bruto de fundição	-	227,8 HV30; carbonetos presentes	Alta dureza inicial pode vir acompanhada de fragilidade e heterogeneidade
S1	1000 °C	Grão médio de 323,3 µm; carbonetos ainda frequentes	Dissolução parcial pode não eliminar pontos frágeis
S2	1100 °C	Grão médio de 409,2 µm; redução de carbonetos	Compromisso entre dissolução e crescimento de grão
S3	1150 °C	Grão médio de 1014,4 µm	Crescimento excessivo pode reduzir resistência à fratura e distribuição de deformação
S4	1200 °C	176,7 HV30; grão médio de 881,6 µm	Menor dureza inicial, mas matriz mais solubilizada; desempenho depende do encruamento em serviço

Fonte: elaborado pelo autor com base em Wahyudi et al. (2023).

Fundição, temperatura de vazamento e segregação

A resistência ao desgaste do aço Hadfield começa a ser definida antes do tratamento térmico, ainda no forno e no molde. A temperatura de fusão e vazamento interfere na fluidez do metal, no preenchimento da cavidade, na alimentação da peça e na solidificação. Temperaturas muito baixas podem gerar defeitos de preenchimento; temperaturas excessivamente altas aumentam a segregação, o crescimento de grão e a formação de carbonetos heterogêneos.

Balogun, Esezobor e Agunsoye (2008) investigaram temperaturas de fusão e vazamento entre 1380 e 1550 °C. Os autores observaram que temperaturas elevadas favorecem segregação de elementos de liga e formação de carbonetos em regiões específicas. A presença dessas heterogeneidades ajuda a explicar padrões de desgaste irregulares em mandíbulas de britadores, principalmente quando diferentes regiões da peça apresentam microestruturas distintas.

A segregação afeta diretamente o encruamento. O movimento de discordâncias e a formação de maclas dependem de uma matriz capaz de deformar de modo relativamente uniforme. Quando há regiões enriquecidas em carbonetos ou elementos segregados, a deformação se concentra e pode iniciar trincas. O resultado é um material que, apesar da composição nominal correta, não apresenta a resposta tribológica esperada.

A análise de peças de britadores reforça essa preocupação. Mandíbulas de britagem trabalham com gradientes de carga, impacto e abrasão ao longo da superfície. Se a microestrutura também varia de forma acentuada, algumas regiões podem endurecer adequadamente, enquanto outras se desgastam ou trincam de maneira prematura. Assim,

controle de vazamento, alimentação e solidificação deve ser tratado como parte da especificação do material.

Em processo industrial, recomenda-se controlar temperatura de vazamento, projeto de alimentação, uso de retornos, limpeza do metal, desoxidação, tipo de molde, espessura da peça e velocidade de resfriamento. A solução térmica posterior melhora a microestrutura, mas não elimina todas as macrosegregações. Por isso, engenharia de fundição e engenharia tribológica precisam caminhar juntas: a peça deve solidificar de modo homogêneo e receber tratamento térmico efetivo em toda a seção.

Em resumo, as faixas de temperatura na produção do aço Hadfield interferem diretamente na qualidade do produto final, e estes efeitos devem ser monitorados para que as características do aço manganês Hadfield sejam preservadas, como mostra a Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 - Efeitos metalúrgicos associados à temperatura de vazamento em aço manganês

Faixa ou condição	Efeito metalúrgico provável	Consequência tribológica
Temperatura muito elevada	Maior tempo de solidificação, segregação e carbonetos grosseiros	Desgaste irregular, trincas e menor eficiência do encruamento
Acima de 1450 °C	Tendência de segregação Cr-C em contornos de grão	Concentração de tensões e possibilidade de fratura localizada
1400-1450 °C	Distribuição mais uniforme de carbonetos, segundo Balogun et al.	Maior estabilidade de desgaste em mandíbulas de britadores
Temperatura muito baixa	Menor fluidez e maior risco de defeitos de preenchimento	Defeitos atuam como iniciadores de trinca sob impacto
Tratamento térmico posterior	Dissolve parte dos carbonetos e melhora a matriz	Não elimina completamente macrosegregação já formada

Fonte: elaborado pelo autor com base em Balogun, Esezobor e Agunsoye (2008).

Microligação, dopagem e refino de grão

As rotas modernas de melhoria do aço Hadfield procuram preservar a matriz austenítica tenaz enquanto elevam resistência ao desgaste e estabilidade microestrutural. Entre essas rotas estão a adição de elementos formadores de carbonetos, como Cr, Ti, V e Nb, e a dopagem com partículas capazes de atuar como sítios de nucleação. O objetivo é controlar a microestrutura desde a solidificação, reduzindo grãos grosseiros, segregações e microporosidades. O risco está em transformar o ganho de dureza em perda de tenacidade quando se formam fases frágeis ou contínuas em contornos de grão.

Kalandyk et al. (2015) observaram que adições de Cr e Ti em aços manganês fundidos favoreceram a formação de fases carbídicas complexas e aumentaram a resistência ao desgaste abrasivo no ensaio Miller. O resultado mostra que carbonetos não são necessariamente prejudiciais. Quando finos, estáveis e bem distribuídos na matriz, podem dificultar o microcorte e aumentar a dureza. O problema está nos carbonetos grosseiros e intergranulares, que favorecem fratura e reduzem a resistência ao impacto.

Zellagui et al. (2022) discutem diferentes elementos de liga. O cromo melhora a resistência ao desgaste e o comportamento de encruamento, mas o excesso de carbonetos de manganês e cromo reduz a tenacidade. O vanádio forma carbonetos muito duros, com dureza na faixa de 2600 a 3000 HV, elevando dureza e resistência ao desgaste, embora possa diminuir a resistência ao impacto em teores elevados. O níquel estabiliza a austenita e pode melhorar ductilidade e usinabilidade, sem atuar como forte formador de carbonetos. Esses exemplos mostram que a liga deve ser projetada para o regime tribológico de interesse, e não para maximizar dureza de forma indiscriminada.

Sajjadi et al. (2024) estudaram a dopagem com CeO_2 e Hf em aço Hadfield contendo aproximadamente 1,27% C e 11,7% Mn. A adição de 0,1% CeO_2 reduziu o tamanho médio de grão de 96,38 para 88,03 μm e reduziu microporosidades; a macrodureza do material bruto passou de 253,66 HV para 459 HV, aumento de 80,95%. Após tratamento térmico, as condições dopadas com CeO_2 e Hf apresentaram dureza superior à do material base tratado, além de aumento de energia de impacto de 19,29% e 45,61%, respectivamente. Os dados indicam que o refino microestrutural pode melhorar simultaneamente dureza e absorção de energia quando bem conduzido.

O refino de grão melhora a distribuição da deformação plástica. Astaf'ev (1997) observou que aços de grão grosseiro concentram deformação em contornos de grão e se tornam mais suscetíveis à fratura intergranular, enquanto grãos finos favorecem deformação no interior dos grãos, maior endurecimento por deformação e melhor conjunto de propriedades mecânicas. Em desgaste abrasivo com impacto, esse efeito é decisivo: a superfície precisa endurecer repetidamente sem permitir propagação rápida de trincas.

Na prática industrial, microligação e dopagem devem ser avaliadas pelo custo, pela disponibilidade e pela possibilidade de controle no processo. Um bom resultado em corpo de prova pequeno não garante o mesmo comportamento em peças espessas, com geometria complexa e gradientes térmicos. Ensaios laboratoriais devem ser acompanhados por análise metalográfica em diferentes regiões da peça, medição de dureza após serviço e inspeção de trincas. Só assim uma melhoria metalúrgica pode se converter em aumento real de vida útil. Cada elemento e cada concentração dos elementos químicos adicionados possuem funções benéficas e limitantes na base do aço manganês, como mostra a Tabela 13 abaixo. Estes elementos, na quantidade certa, podem aprimorar e até modificar a estrutura cristalina para que a resistência aumente ainda mais.

Tabela 13 - Efeito esperado de elementos e dopantes no aço Hadfield

Elemento/adição	Mecanismo principal	Benefício potencial	Limitação ou cuidado
Cr	Formação de carbonetos e aumento de endurecimento	Maior resistência ao desgaste e menor coeficiente de atrito	Excesso favorece carbonetos frágeis em contornos de grão
Ti	Formação de carbonetos/nitretos e modificação da matriz	Aumento de dureza e resistência à abrasão em ensaio Miller	Pode reduzir propriedades se houver segregação
V	Formação de VC de alta dureza	Maior resistência ao microcorte	Redução de tenacidade quando em teor elevado
Ni	Estabilização da austenita	Ductilidade e usinabilidade relativamente melhores	Não aumenta dureza por carbonetos duros
CeO_2	Nucleação heterogênea e redução de microporosidade	Refino de grão e aumento de dureza no bruto de fundição	Controle de distribuição e quantidade é essencial
Hf	Formação de carbonetos arredondados e modificação de inclusões	Aumento de energia absorvida em impacto após tratamento térmico	Custo e controle de processo podem limitar aplicação

Fonte: elaborado pelo autor com base em Kalandyk et al. (2015), Zellagui et al. (2022) e Sajjadi et al. (2024).

Modelo de seleção do aço Hadfield em aplicações abrasivas

A seleção do aço Hadfield deve começar por uma pergunta simples: a aplicação fornece energia suficiente para encruar a superfície? Quando a resposta é positiva, a liga tende a ser vantajosa, pois combina camada superficial endurecida em serviço e núcleo tenaz. Quando a resposta é negativa, a baixa dureza inicial pode levar a desgaste acelerado. Essa lógica explica a consolidação do Hadfield em britadores, cruzamentos ferroviários e peças de impacto, mas também explica suas limitações em abrasão fina e deslizante sem choque.

O segundo critério é a natureza do abrasivo. Rochas duras, partículas angulares e minérios altamente abrasivos favorecem microcorte severo. Nessa situação, o desempenho do Hadfield depende da rapidez com que a camada encruada se forma. Se o abrasivo for fino e a carga baixa, o contato pode apenas riscar ou polir a superfície, sem deformá-la de modo significativo. Nesses casos, ligas martensíticas ou ferros fundidos brancos com carbonetos podem apresentar menor perda de massa.

O terceiro critério é a geometria da peça. Mandíbulas de britadores, revestimentos e martelos possuem regiões de concentração de carga, cantos, furos, encaixes e variações de espessura. Esses detalhes alteram a distribuição de tensões e a eficiência do encruamento. Geometrias que favorecem contato repetido e compressivo tendem a formar camada endurecida estável; geometrias com cantos vivos, defeitos de fundição ou reparos inadequados podem concentrar trincas.

O quarto critério é a manutenção. O Hadfield é difícil de usinar porque o próprio corte induz encruamento. Reparo, soldagem e acabamento precisam evitar aquecimento excessivo e tensões residuais. Zellagui et al. (2022) destacam que a usinagem de aços de alto manganês provoca desgaste rápido de ferramenta e pode introduzir tensões superficiais. Em campo, uma

peça tecnicamente bem selecionada pode ter desempenho reduzido quando reparada de maneira incorreta.

O quinto critério é econômico. O Hadfield pode custar mais do que aços carbono comuns, mas sua vida útil em condições adequadas compensa o investimento. Se a aplicação não ativa o encruamento, porém, esse custo perde justificativa. A análise econômica deve incluir preço inicial, disponibilidade de fundição qualificada, tempo de parada para troca, facilidade de manutenção, risco de falha e valor do equipamento protegido. Em mineração, uma parada não programada pode superar amplamente a diferença de preço entre materiais.

Com base nesses critérios, recomenda-se aplicar o Hadfield em situações de abrasão com impacto moderado a severo, compressão repetida e necessidade de alta tenacidade como mostra a Tabela 14 em seguida. Para abrasão deslizante leve, erosão por partículas finas ou ambientes sem impacto, sua escolha deve ser comparada a materiais de alta dureza inicial. Em peças fundidas espessas, a especificação deve incluir controle de composição, vazamento, tratamento térmico e inspeção metalográfica. A melhor descrição técnica não é apenas 'aço Hadfield', mas aço Hadfield produzido e tratado para o sistema tribológico específico.

Tabela 14 - Matriz de seleção prática para o aço Hadfield

Critério de aplicação	Indicação forte	Indicação intermediária	Indicação fraca
Impacto	Impacto repetido e severo	Impacto moderado ou intermitente	Ausência de impacto
Tipo de abrasão	Abrasão com compressão e choque	Abrasão mista com algum deslizamento	Abrasão fina e puramente deslizante
Necessidade de tenacidade	Alta, com risco de fratura	Média	Baixa, quando dureza é prioridade
Geometria da peça	Peça robusta e submetida a contato compressivo	Geometria com algumas concentrações de tensão	Cantos vivos, soldas críticas ou seções muito heterogêneas
Processo de fabricação	Fundição e solubilização bem controladas	Controle parcial de processo	Segregação, porosidade ou tratamento térmico incerto
Manutenção	Troca planejada e reparo controlado	Reparos ocasionais com procedimento	Usinagem frequente ou soldagem sem controle

Fonte: elaborado pelo autor.

Proposta de plano experimental para continuidade do PFC

Embora este trabalho tenha caráter teórico, a revisão permite propor uma continuidade experimental coerente. O objetivo seria comparar amostras de aço Hadfield com diferentes teores de carbono, tratamentos térmicos e condições de superfície em ensaios representativos de regimes abrasivos distintos. Como o Hadfield responde de forma diferente em baixa carga, abrasão deslizante e impacto abrasivo, um único ensaio não seria suficiente. Recomenda-se combinar pino-disco, ensaio Miller e, se disponível, ensaio de impacto abrasivo ou britador de laboratório.

A primeira etapa seria preparar amostras com composição controlada, por exemplo em três níveis de carbono dentro da faixa típica do Hadfield: baixo, médio e alto. O teor de

manganês deveria permanecer em faixa próxima para reduzir variáveis. Após a fundição, as amostras seriam submetidas a duas ou três condições de austenitização, como 1050, 1100 e 1150 °C, com mesmo tempo de encharque e têmpera em água. Antes dos ensaios de desgaste, seriam realizadas metalografia, dureza inicial, análise de carbonetos e medição de tamanho de grão.

A segunda etapa envolveria ensaios de abrasão. No pino-disco, poderiam ser usadas lixas #220 e #320, carga constante e distância de deslizamento padronizada, em lógica semelhante à de Oliveira (2016). No ensaio Miller, a mistura de SiC e água permitiria avaliar abrasão em meio úmido e partículas livres, conforme abordagem de Kalandyk et al. (2015). Em um terceiro ensaio, com impacto abrasivo, seria possível verificar se as tendências observadas em deslizamento se mantêm quando o encruamento é mais intensamente ativado.

A terceira etapa consistiria em medir respostas múltiplas: perda de massa, taxa de desgaste, rugosidade, microdureza antes e depois do ensaio, profundidade da camada encruada, microestrutura em seção transversal e morfologia da superfície desgastada por MEV. Medir apenas a dureza superficial pode ser insuficiente. O ideal seria construir um perfil de microdureza da superfície ao núcleo, identificando a espessura da camada endurecida, pois a resistência do Hadfield depende justamente da formação e manutenção dessa camada.

A quarta etapa seria correlacionar os dados. Espera-se, por exemplo, que amostras com maior teor de carbono apresentem menor perda em abrasão deslizante, mas não necessariamente maior ganho relativo de dureza. Amostras com tratamento térmico mais eficiente podem ter menor dureza inicial e, ainda assim, melhor encruamento e maior tenacidade em impacto. Amostras de grão mais fino tendem a distribuir melhor a deformação e reduzir trincas. Um planejamento fatorial permitiria separar os efeitos principais de teor de carbono, temperatura de tratamento e granulometria abrasiva.

O plano experimental deve incluir controle de repetibilidade. Ensaios de desgaste são sensíveis a alinhamento, limpeza, umidade, rugosidade inicial, renovação do abrasivo e precisão na medição de massa. Cada condição deveria ser repetida ao menos três vezes, com cálculo de média e desvio padrão. Sem repetição, diferenças pequenas de perda de massa podem levar a conclusões frágeis. A documentação fotográfica e metalográfica deve acompanhar todos os resultados numéricos.

Por fim, seria recomendável comparar os resultados laboratoriais com uma peça real. Um corpo de prova retirado de mandíbula ou revestimento usado em serviço poderia ser avaliado quanto à dureza superficial, profundidade de encruamento e presença de trincas. Essa validação ajudaria a transformar dados de laboratório em critério de seleção industrial. A ponte

entre ensaio controlado e aplicação real é essencial porque o Hadfield é um material dependente do serviço: parte da microestrutura relevante se forma durante o uso. A Tabela 15 abaixo sintetiza as variáveis, respostas e finalidades destes ensaios de acordo com cada etapa do processo.

Tabela 15 - Plano experimental sugerido para estudos futuros

Etapa	Variáveis controladas	Respostas medidas	Finalidade
Caracterização inicial	Composição, tamanho de grão, carbonetos e dureza inicial	OM/MEV, dureza, composição química	Definir a condição metalúrgica antes do desgaste
Tratamento térmico	Temperatura, tempo de encharque e meio de têmpera	Dureza, carbonetos residuais e grão	Avaliar a qualidade da solubilização
Pino-disco	Granulometria, carga e distância de deslizamento	Perda de massa, sulcos e microdureza pós-ensaio	Representar abrasão deslizante controlada
Miller	Abrasivo SiC/água, tempo e carga	Perda acumulada e taxa de desgaste	Avaliar abrasão por partículas em suspensão
Impacto abrasivo	Energia de impacto, abrasivo e número de ciclos	Perda, trincas e camada encruada	Aproximar condições de britagem
Pós-ensaio	Perfil de profundidade e superfície desgastada	MEV, rugosidade e microdureza transversal	Correlacionar mecanismo de dano e encruamento

Fonte: elaborado pelo autor.

Síntese crítica integrada dos resultados

A análise aprofundada confirma que a tribologia do aço Hadfield é um problema de sistema. A liga tem grande potencial quando sua matriz austenítica consegue deformar e endurecer de forma controlada. Esse potencial, porém, diminui quando há baixa severidade de contato, carbonetos mal distribuídos, segregação de fundição, grão grosseiro, tratamento térmico inadequado ou manutenção incorreta. A pergunta de engenharia, portanto, não é simplesmente se o Hadfield resiste ao desgaste, mas em quais condições ele consegue ativar seu mecanismo de resistência.

Os dados de Oliveira (2016) evidenciam a importância do carbono e da granulometria abrasiva em abrasão deslizante. Kalandyk et al. (2015) mostram que carbonetos complexos podem melhorar a resistência em meio com SiC. Wahyudi et al. (2023) demonstram que a solubilização reduz carbonetos e dureza inicial, mas modifica grão e matriz. Balogun, Esezobor e Agunsoye (2008) apontam a influência do vazamento e da segregação em mandíbulas de britadores. Sajjadi et al. (2024) e Astaf'ev (1997) reforçam a relevância do refino de grão e da dopagem. Em conjunto, esses estudos indicam que a resistência tribológica resulta da microestrutura produzida na fabricação e da microestrutura gerada em serviço.

A partir dessa visão, a aplicação do Hadfield deve ser acompanhada de especificações mais completas. Além da composição nominal, convém controlar fósforo e enxofre, limitar carbonetos em contornos de grão, documentar o tratamento térmico, realizar inspeção metalográfica, verificar dureza inicial e, quando possível, avaliar a capacidade de encruamento

após ensaio ou serviço. Em componentes críticos, a análise de falha deve distinguir desgaste normal, desgaste por baixa ativação de encruamento e dano associado a defeitos de fabricação.

Como contribuição acadêmica, esta revisão organiza os artigos em uma estrutura de decisão. O aço Hadfield é recomendado quando há impacto, compressão e abrasão severa; deve ser especificado com cautela quando a abrasão é mista; e precisa ser comparado a outras ligas quando a solicitação é predominantemente deslizante e leve. A seleção ótima exige alinhar composição, fundição, tratamento térmico, projeto da peça e regime tribológico. Essa leitura integrada é coerente com a natureza do material e amplia a utilidade prática da revisão bibliográfica.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aço manganês Hadfield permanece entre os materiais mais importantes para aplicações em que desgaste abrasivo e impacto ocorrem simultaneamente. Sua principal característica não é a dureza inicial, mas a capacidade de formar uma camada superficial encruada sobre uma matriz austenítica tenaz. Essa resposta permite que a superfície resista progressivamente ao microcorte, enquanto o interior absorve energia sem fratura frágil.

A resistência ao desgaste abrasivo do Hadfield depende da interação entre composição química, tratamento térmico, microestrutura e severidade do contato. Carbono e manganês devem estar em equilíbrio para estabilizar a austenita e favorecer o encruamento. Carbonetos podem contribuir para resistência ao microcorte quando finos e bem distribuídos, mas prejudicam a tenacidade quando aparecem de forma contínua em contornos de grão. Por isso, a solubilização e a têmpera em água são etapas fundamentais para obter matriz austenítica adequada.

Os estudos analisados mostram que adições de Cr e Ti, controle de temperatura de vazamento, refino de grão e dopagem com CeO_2 ou Hf podem melhorar propriedades específicas. Ainda assim, qualquer melhoria precisa ser avaliada dentro do sistema tribológico real. Em baixa carga e abrasão fina, o Hadfield pode não encruar o suficiente; em alta carga e impacto, tende a apresentar desempenho superior pela combinação entre endurecimento superficial e tenacidade.

Conclui-se que a seleção do aço Hadfield para resistência ao desgaste abrasivo deve se apoiar nas condições de aplicação, e não apenas na composição nominal. O material é indicado para britadores, revestimentos, mandíbulas, componentes ferroviários e peças submetidas a abrasão com impacto. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se comparar experimentalmente amostras com diferentes tratamentos térmicos e teores de carbono em ensaios que combinem abrasão e impacto, aproximando a condição de laboratório das condições reais de serviço.

REFERÊNCIAS

ACME ALLOYS. **Austenitic Manganese Steel (AMS) / Hadfield Steel - Uses, Limitations & Impediments.** New Delhi: Acme Alloys, s.d.

AGUNSOYE, J. O.; TALABI, S. I. **Properties optimization of Hadfield austenitic manganese steel casting.** Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering, Hunedoara, v. 13, n. 4, p. 101-108, 2015.

ASTAF'EV, A. A. **Effect of grain size on the properties of manganese austenite steel 110G13L.** Metal Science and Heat Treatment, v. 39, n. 5-6, p. 185-188, 1997.

BALOGUN, S. A.; ESEZOBOR, D. E.; AGUNSOYE, J. O. **Effect of melting temperature on the wear characteristics of austenitic manganese steel.** Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, v. 7, n. 3, p. 277-289, 2008.

JABŁOŃSKA, M.; ŚMIGLEWICZ, A. **Analysis of substructure of High-Mn steels in the context of dominant stress mechanism.** Defect and Diffusion Forum, v. 334-335, p. 177-181, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.334-335.177.

KALANDYK, B.; TĘCZA, G.; ZAPAŁA, R.; SOBULA, S. **Cast high-manganese steel - the effect of microstructure on abrasive wear behaviour in Miller test.** Archives of Foundry Engineering, v. 15, n. 2, p. 35-38, 2015. DOI: 10.1515/afe-2015-0033.

OLIVEIRA, M. dos A. **Desgaste abrasivo do aço Hadfield com diferentes teores de carbono em abrasômetro do tipo pino-disco.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

REYES-CALDERÓN, F.; MEJÍA, I.; BOULAAJAJ, A.; CABRERA, J. M. **Effect of microalloying elements (Nb, V and Ti) on the hot flow behavior of high-Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel.** Materials Science and Engineering A, v. 560, p. 552-560, 2013.

SAJJADI, S. M.; BOUTORABI, S. M. A.; MOHAMMADALIHA, M.; BALI, S. **Effects of CeO_2 and Hf as inoculant on the microstructure and impact properties of Hadfield austenitic manganese steel.** International Journal of Metalcasting, v. 18, n. 2, p. 1608-1618, 2024. DOI: 10.1007/s40962-023-01136-0.

WAHYUDI, H.; PRATIWI, S. E.; SUPRIYANTO, A. A.; AJI, D. P. B. **The influence of heat rate and austenitization temperature on microstructure and hardness of Hadfield steel.** SINERGI, v. 27, n. 2, p. 241-248, 2023. DOI: 10.22441/sinergi.2023.2.012.

WEN, Y. H.; PENG, H. B.; SI, H. T.; XIONG, R. L.; RAABE, D. **A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much lower impact deformation than Hadfield manganese steel.** Materials & Design, v. 55, p. 798-804, 2014.

ZELLAGUI, R.; HEMMOUCHE, L.; AIT-SADI, H.; CHELLI, A. **Effect of element addition, microstructure characteristics, mechanical properties, machining and welding processes of the Hadfield austenitic manganese steel.** Archives of Metallurgy and Materials, v. 67, n. 3, p. 863-868, 2022. DOI: 10.24425/amm.2022.139676.